

Olli Taipale

# Energianhallintajärjestelmän suunnittelu ja toteutus HSY-kuntayhtymälle

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Insinöörityö  
8.5.2012

|   |  |
|---|--|
| Tekijä<br>Otsikko<br>Sivumäärä<br>Aika  | Olli Taipale<br>Energianhallintajärjestelmän suunnittelu ja toteutus HSY-kuntayhtymälle<br>32 sivua + 3 liitettä<br>8.5.2012 |
| Tutkinto  | insinööri (AMK)  |
| Koulutusohjelma   | sähkötekniikan koulutusohjelma   |
| Suuntautumisvaihtoehto  | sähkövoimatekniikka  |
| Ohjaajat  | sähköinsinööri Jan Strömdahl<br>diplomi-insinööri Tiina Koivunen   |
| <p>Insinöörityössä pyrittiin kehittämään ja toteuttamaan jätevedenpuhdistuslaitoksen kattavaa energianhallintajärjestelmä HSY Suomenojan jätevedenpuhdistuslaitokselle. Energianhallintajärjestelmän hyödyt tulevat esille pitkällisen mittausten analysoimisen perusteella. Nykyään kaikki energia-asiat ovat esillä pyrittäessä kohti parempaa energiankäytön hallintaa.</p> <p>Työn lähtökohtana toimi Suomenojan jätevedenpuhdistamon tarve parantaa energiatehokkuuttaan. Uusi energianhallintajärjestelmä päivittää jätevedenpuhdistuslaitoksen energianseurannan vastaamaan nykypäivän suuntauksia. Energianhallintajärjestelmän suunnittelussa ja toteutuksessa käytettiin monen eri alan ammattilaisia. Suurimmat toteutukset järjestelmän suunnittelussa tulivat automaation, tietotekniikan ja sähkövoimatekniikan puolelta. Toteutuksista vastasivat muun muassa sähköasentajat ja automaatioasentajat.</p> <p>Insinöörityön aikana energianhallintajärjestelmän suunnittelu saatiin valmiiksi. Käytännön-toteutuksesta jäi keskeneräiseksi energianhallintajärjestelmän tietotekninen ohjelmointi. Valmistuessaan järjestelmä mittaa puhdistuslaitoksen kaikkia suuria sähkönkulutuspisteitä. Järjestelmän tietojen avulla voidaan huomata sähkön laadussa, prosessien optimoimisessa tai koneiden toiminnassa vaadittavat korjaustarpeet.</p> |  |
| Avainsanat  | energianhallintajärjestelmä, HSY, jätevedenpuhdistamo  |

|   |   |
|---|---|
| Author<br>Title<br>Number of Pages<br>Date  | Olli Taipale<br>Energy Management System Designing and Execution for HSY Kuntayhtymä<br>32 pages + 3 appendices<br>8 May 2012 |
| Degree  | Bachelor of Engineering   |
| Degree Programme  | Electrical Engineering  |
| Specialisation option   | Electrical Power Systems  |
| Instructors   | Jan Strömdahl, Electrical Engineer<br>Tiina Koivunen, Master of Science in Engineering  |
| <p>The purpose of this thesis was to develop and execute a full energy management system for HSY Suomenoja wastewater treatment plant. The benefits of the energy management system become clear after analyzing a long period of measurements. Nowadays, with a goal for better energy management, all the energy issues are notable.</p> <p>The starting point was the Suomenoja wastewater treatment plant's need to improve its energy efficiency. The new energy management system is going to upgrade the sewage treatment plant's energy use monitoring to meet today's trends. The energy management system design and implementation was made by using many different professionals. The largest implementations in designing the system came from automation, information technology and electrical power technology's side. Execution was made for instance by electricians and automation mechanics.</p> <p>During the making of this thesis, the engineering design of the energy management system was completed. Practical execution was left unfinished for the energy management system computer programming part. When completed, the system measures the water treatment plant's electricity consumption at all major points. The system data can be used to find needs to improve matters related to power quality, optimizing processes or machine function.</p> |   |
| Keywords  | Energy management system, HSY, wastewater treatment plant   |

# Sisällys

## Tiivistelmä

## Abstract

## Sisällys

## Lyhenteet

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>Johdanto</b>   | 1  |
| <b>2</b> | <b>Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä</b>      | 2  |
| <b>3</b> | <b>Opinnäytetyön tavoitteet ja lähtökohdat</b>              | 5  |
| <b>4</b> | <b>Sähkötehon mittausten teoriaa</b>                        | 8  |
| 4.1      | Tehojen määrittely  | 8  |
| 4.2      | Sähköenergia  | 10 |
| 4.3      | Sähkön laatu  | 11 |
| <b>5</b> | <b>Sähköenergian mittaaminen</b>                            | 16 |
| 5.1      | Tasa- ja vaihtosähkön mittaukseen käytettävät kytkennät     | 16 |
| 5.2      | Verkkoanalysaattori   | 20 |
| <b>6</b> | <b>Energianhallintajärjestelmän suunnittelu ja toteutus</b> | 24 |
| 6.1      | Energianhallintajärjestelmän suunnittelu                    | 24 |
| 6.2      | Järjestelmän toteutus                                       | 28 |
| <b>7</b> | <b>Yhteenveto</b>   | 30 |
|          | <b>Lähteet</b>  | 31 |

## Liitteet

Liite 1. Suomenojan jätevedenpuhdistamon prosessikaavio

Liite 2. Suomenojan jätevedenpuhdistamon 20 kV:n yleiskaavio

Liite 3. Suomenojan jätevedenpuhdistamon ostosähkö 2010 - 2011

## Lyhenteet

D-kytkentä kolmiokytKentä, kytkentä muodostaa kolmion, ei nollajohdinta

HSY Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä

P pätöteho eli resistiivinen teho

Q loisteho eli reaktiivinen teho

S näennäisteho koostuu pätö- ja loistehosta

THD jännitteen harmoninen kokonaissärö

Y-kytkentä tähtikytKentä, yhdistyy tähtipisteessä nollajohtimeksi

## **1 Johdanto**

Insinöörityössä esitellään Suomenojan jätevedenpuhdistamon sähköverkon kattava energianhallintajärjestelmä. Työssä pyritään selvittämään, miten järjestelmä toimii, miten se rakennettiin ja mistä osista se koostuu.

Toimivan ja tehokkaan energianhallintajärjestelmän rakentaminen Suomenojan jätevedenpuhdistuslaitokselle on tärkeää laitoksen ylläpitämiseksi. Energianhallintajärjestelmä tuo uutta teknologiaa jo hieman vanhahkon laitoksen prosessien optimoimiseen. Järjestelmän varsinaiset hyödyt tulevat esiin pitkällisen tietojen analysoinnin, energiansäästöjen ja prosessinsäädön kautta. Järjestelmän avulla voidaan saada tärkeää mittaustietoa heti energianhallintajärjestelmän käynnistämisen jälkeen.

Työssä käsitellään energianmittaukseen liittyviä perustietoja, kuten sähköenergiaa, sähkön laatua sekä mittauslaitteistoa. Työssä uppoudutaan järjestelmän suunnitteluun, sekä toteutuneiden osakokonaisuuksien esittelyyn.

## **2 Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä**

HSY

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä (HSY) on pääkaupunkiseudun yhteinen ympäristöpalveluita tarjoava yhtymä. Kuntayhtymän päätoimialueet ovat vesi- ja jätehuolto sekä seututietopalvelut. HSY aloitti toimintansa 1.1.2010, jolloin Helsingin, Espoon, Vantaan ja Kauniaisen vesilaitokset, jätehuolto sekä seutu- ja ympäristötiedon toimipisteet yhdistyivät. Vuoden 2010 lopussa HSY:n palveluksessa työskenteli 714 vakinaista ja 43 määräaikaista työntekijää.

Suomenojan jätevedenpuhdistamo

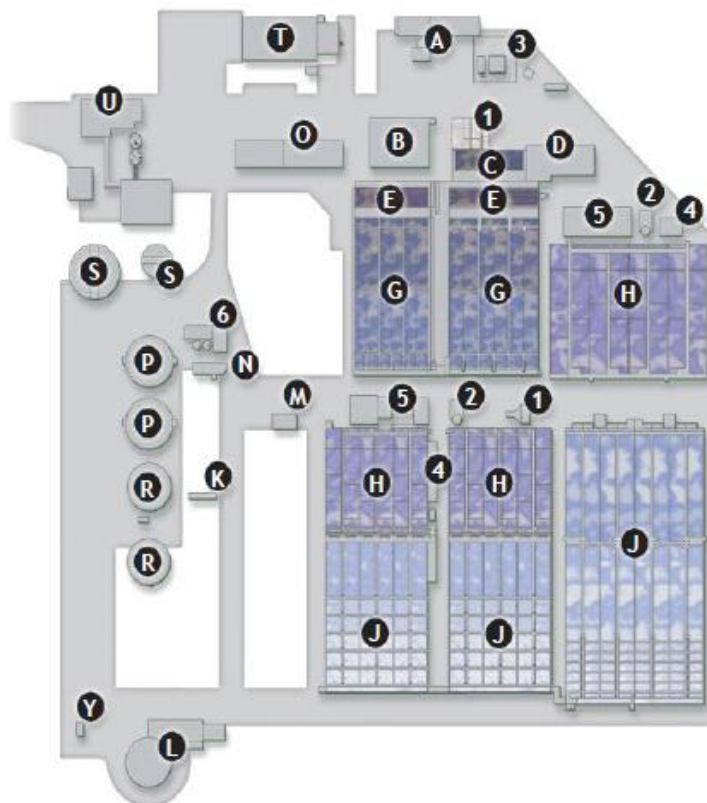
Insinööriyön kohteena on Suomenojan jätevedenpuhdistamo, jonka omistaa Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. Tarkasti ottaen HSY:n sisällä puhdistamo kuuluu vesihuollon toimialaan. Vesihuolto on ylivoimaisesti suurin työllistäjä Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymässä. Vesihuolto työllisti vuoden 2010 lopussa noin 67 % kaikista HSY:n työntekijöistä [1; 2, s. 43.]

Suomenojan puhdistamo on Suomen toiseksi suurin jätevedenpuhdistamo. Puhdistamo aloitti puhdistusprosessinsa jo vuonna 1963. Siihen aikaan se toimi Espoon kylätaajaman lammikkopuhdistamona. Tästä on kuitenkin menty paljon eteenpäin. Nykyään puhdistamo pystyy käsittelemään jätevettä 100 000 kuutiometriä päivässä.

Suomenojan jätevedenpuhdistamon iästä päätellen voidaan olettaa, että kaikki laitteet puhdistamolla eivät ole aivan uusinta teknologiaa. Jätevedenpuhdistuslaitosta päivitetään säännöllisesti ja juuri sen takia energianhallintajärjestelmä puhdistamolle tarvitaan. Suurimpina uudistuksina laitokselle on tullut vuonna 1974 lopputuotteen kuljetukseen rakennettu 7,5 km pitkä purkutunneli. Purkutunneli kuljettaa puhdistuslaitoksen lopputuotteen merelle Gasgrundet-saaren edustalle. Toinen suuri päivitys laitokselle oli vuonna 1997 valmistunut typenpoistojärjestelmä. Typenpoisto tapahtuu esidenitrifikaatio-prosessilla. Denitrifikaatio on prosessi, jossa metaanin ja tiettyjen bakteerien yhteistoiminnalla saadaan suurin osa typestä poistettua.

Laitoksella jäteveden puhdistus tapahtuu noin 24 tunnissa. Suurpiirteisesti jäteveden puhdistusprosessi (liite 1) alkaa Suomenojan jätevedenpuhdistamolla karkeavälppäyksellä, jonka jälkeen jätevesi siirtyy ruuvipumppaamolle. Tässä prosessissa suuret ruuvit toimivat nostopumppaamona. Seuraavana jätevesi kulkee hiekanerotuspisteeseen, jossa nimen mukaisesti hiekka poistetaan painovoimaan perustuvalla prosessilla. Siitä vesi kulkee hienoväljän (siivilän) läpi, jossa kiinteät aineet suodatetaan vedestä pois. Tästä jätevesi jatkaa matkaansa esi-ilmastukseen. Esi-ilmastuksen jälkeen esiselkeytykseen, missä jäljellä olevasta vedestä poistetaan liete. Tämä kohta prosessia on sähkötekniisesti mietittynä koko prosessin mielenkiintoisin kohta, sillä esiselkeytyksessä poistettavasta lietteestä valmistetaan mädättämissä biokaasua, joka käytetään laitoksen lämmön ja sähköntuotantoon. Jätevedenkulku tästä jatkuu metaani-altaan läpi jälki-ilmastukseen ja siitä taas jälki selkeytyksen kautta poistotunneliin. (Liite 1.)

Jätevesi kiertää vuorokauden aikana puhdistamon läpi ja käy jokaisessa laitoksen osassa. Kuvassa 1 nähdään Suomenojan jätevedenpuhdistamon rakenne. Jätevesi kiertää laitoksen kokonaisuudessaan läpi, kuitenkin siten, että se päättyy lopuksi N-kirjaimen kohdalle.



Kuva 1. Suomenojan jätevedenpuhdistamon rakenne [3; 4]



## Kuvan 1 kirjaimien selvennykset

O. Prosessivalvonta  
(käyttö- ja  
tutkimusyksikkö)

### Esikäsittely

A. Karkeavälppäys  
B. Ruuvipumppaamo  
C. Hiekanerotus  
D. Hienovälppäys

### Vesiprosessi

E. Esi-ilmastus  
G. Esiselkeytys  
H. Ilmastusaltaat  
I. Nostopumppaamo  
J. Jälkiselkeytys  
M. Lähtevä mittaus  
N. Purkutunnelin  
lähtö

### Lieteprosessi

P. Esisakeuttamo  
R. Mädättämö  
S. Jälkisakeuttamo  
U. Lietteen kuivaus  
K. Kaasumoottorivoimalaitos  
L. Kaasukello ja  
lämpökeskus  
Y. Kaasunyljäämäpoltin  
Kemikaalit  
1. Ferroasema  
2. Kalkki/soodaasema  
3. Metanoliasema

### Aputoiminnot

4. Analyysirakennus  
5. Kompressoriasema  
6. Käyttövesiasema  
T. Tutkimusasema  
(SYKE)

## Suomenojan 20 kV:n sähköverkon rakenne

Suomenojan jätevedenpuhdistuslaitoksen 20 kV:n sähköverkko koostuu neljästä muuntamosta ja seitsemästä eri muuntajasta. Muuntamot ovat nimetty suurimpien kulutuspisteiden mukaan. Sähköverkko toimii pääpiirteiltään siten, että muuntamolle 1 tulee syöttökaapelit Fortumin verkosta. Tämän muuntamon kautta 20 kV:n verkko jakautuu muuntamoille 2 ja 3. Muuntamo 4 on pelkästään biokaasulaitoksen käytössä oleva yhden muuntajan laitos, jonka pääasiallisena tarkoituksena on tuottaa sähköä jätevedenpuhdistamon verkkoon takaisin. Neljännen muuntamon sähkösyöttö takaisin jätevedenpuhdistuslaitoksen sähköverkkoon kulkee muuntamon 2 kautta. Käytännössä siis muuntamot 1, 2 ja 3 ovat kuluttavia, ja neljäs muuntamo tuottaa sähköä takaisin verkkoon. (Liite 2.)

### **3 Opinnäytetyön tavoitteet ja lähtökohdat**

Suomenojan jätevedenpuhdistuslaitos on Suomen toiseksi suurin ja Euroopan tasolla suurimpiin lukeutuva jätevedenpuhdistuslaitos. Laitoksen energiankulutus on yksittäisen kuluttajan silmissä todella suuri. Vuonna 2010 laitoksen sähkönkulutus oli 14 500 MWh. Tästä sähkömäärästä jätevedenpuhdistuslaitoksen omatuotanto oli 5 452 MWh. Sähköä tuotettiin kaasugeneraattorilla, joka saa energiansa laitoksen mädättämöiden tuottamasta biokaasusta.

Nykyään Suomenojan jätevedenpuhdistuslaitoksella ei ole reaaliaikaista energianhallintajärjestelmää. Energianseuranta tapahtui ennen sähkölaskujen perusteella, joita puhdistuslaitokselle tuli kuukausittain. Laitoksen sähkönkulutusta seurattiin HSY:n puolesta manuaalisella taulukoinnilla, jossa kuukausittaiset mittaritiedot käytiin tarkistamassa fyysisesti. Muutama vuosi sitten Suomenojan puhdistamo hankki Energiakolmionimisen yrityksen kautta palvelun, jonka tarkoituksena oli saada faktaan perustuvaa energia-analyysia ostosähkön määrästä ulkopuoliselta lähteeltä. Suomenojan jätevedenpuhdistamon ostosähkön seuranta vuosina 2010 - 2011 löytyy liitteestä 3. Ulkopuolinen riippumaton seuranta oli askel oikeaan suuntaan sähkönkulutuksen tarkkailussa, mutta kattavan energianhallintajärjestelmän rakentaminen on ollut vain ajan kysymys.

HSY:n suurimmalla jätevedenpuhdistamolla Viikinmäellä ei ole myöskään energianhallintajärjestelmää. Tämän takia Suomenojan jätevedenpuhdistamon energianhallintajärjestelmän suunnittelu oli aloitettava aivan tyhjästä. Työt Viikinmäen puhdistuslaitoksen energianhallintajärjestelmän rakentamiseksi ovat jo käynnissä, mutta tämä projekti valmistunee kuitenkin vasta hiukan Suomenojan puhdistamon järjestelmän jälkeen.

Energianhallintajärjestelmän hyödyt tulevat olennaisesti ilmi suurissa mittauskohteissa, joissa kuormaa säätämällä voidaan tilanteesta riippuen tehdä suuriakin säästöjä sähköenergian kulutuksessa. Järjestelmän avulla saadaan tärkeää mittaustietoa tallennettua muistiin, jota hyväksikäyttäen puhdistusprosessien optimoiminen helpottuu. Muistiin tallennettujen tietojen perusteella myös sähkömoottorien vikaantumiset voidaan havaita. Moottorien vikaantumisen havaitsemiseen palataan myöhemmin työssä.

Suuret sähköenergian kulutuspisteet ovat niitä pisteitä, joissa prosessin säädöllä voidaan tehdä merkittäviä säästöjä. Tällaisia kulutuspisteitä Suomenojan jätevedenpuhdistamolla ovat ilmastuskompressorit ja lietteenkuivatus. Lietteenuivaus-prosessia ei voida paljoa muokata, sillä sen moottorit tarvitsevat aina yhtä paljon tehoa jokaisessa kuivauksessa. Ilmastuskompressoreita voidaan säätää helpommin, sillä tiedetään lupaviranomaisten, lainsäädännön ja EU-direktiivien määräämät puhtausrajat lopputuotteelle. Ilmastusprosessin tarkka optimoiminen vain puuttui ennen energiankäytön tarkkailun aloittamista.

Vuonna 2010 jätevedenpuhdistuslaitoksen sähköenergian kulutuksesta 44 % (6 420 MWh) kului ilmastuskompressoreilla. Tämän prosessin optimoiminen tulisi tehdä mahdollisimman tarkasti, sillä jo pienelläkin säädöllä voidaan tehdä suuria eroja sähkönkulutukseen. Ilmastuskompressoreiden kulutukseen alettiin kiinnittää huomiota vuonna 2011. Karkealla säädöllä ilmastuskompressoreiden sähkönkulutus putosi siten, että vaikka kesällä 2011 jätevedenpuhdistamon oma sähköntuotanto oli lähes koko kesän poikki, silti koko vuoden kokonaiskulutus oli pienempi kuin vuonna 2010 (liite 3). Tämän säätötoimenpiteen mahdollistivat uudet reaaliaikaiset happimittarit. Säästöt olivat merkittäviä sillä puhdistamon oma energiantuotanto tuotti vuonna 2010 sähköenergiaa 5 452 MWh eli 37,6 % sähkön kokonaiskulutuksesta.

Energianhallintajärjestelmä tehdään siten, että se tallentaa tärkeäksi katsotut tiedot Suomenojan jätevedenpuhdistamon tietokantaan. Näitä tietoja analysoimalla voidaan saada tärkeää tietoa esim. puhdistamon jätevedenpuhdistuksen hyötysuhteesta. Yksinkertaisia laskutoimituksia hyväksikäyttäen voidaan laskea erilaisia arvoja sähköstä, joiden perusteella puhdistamon prosessia voidaan muokata. Puhdistuslaitoksen kuormitus vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Puhdistamon kuormitus on maksimissaan keväisin ja syksyisin tulvien aikaan. Jäteveden tulo puhdistamolle on vähäisintä kesällä lomakausien aikaan, jolloin laitoksen ilmastuskompressorit tulee säätää pienemmälle energian säästämiseksi. Tietoja saadaan myös puhdistamon veden happipitoisuutta tarkkailevilta uusilta happimittareilta, kuten oliko ilmastuksen pienennys vaikuttanut puhdistamon lopputuotteeseen. Tällä menetelmällä pystytään haarukoimaan prosessiin optimaalinen ilmastus jokaista tulevaa jätevesikuutiota kohden.

Tietyissä tapauksissa Suomenojan jätevedenpuhdistuslaitoksella voidaan havainnoida vikatapauksia energianhallintajärjestelmän avulla. Tällaisia tapauksia voi olla esimerkiksi sähkömoottorin laakerin kuluminen tai vaikka lietepumpun tai putken osittainen tukkeutuminen. Näissä vioissa yhteiseksi tekijäksi tulee se, että vian ilmetessä sähkömoottori joutuu tekemään enemmän työtä saavuttaakseen saman lopputuloksen. Tietokantaan tallentuneiden pitkäaikaisien mittaustietojen perusteella voidaan huomata sähkömoottorin kohonnut energiantarve, joka voi viitata vikaan laitteistossa.

Akuuteissa tapauksissa jätevedenpuhdistuslaitoksen vikaantumiset voidaan selvittää vain, jos kaksi eri verkkoanalysointia mittaa symmetrisiä mittauspisteitä. Vikatilanteen syntyessä voidaan huomata energiankulutuksen kasvu verrattuna toiseen symmetriseen mittauspisteeseen. Suomenojan jätevedenpuhdistuslaitoksella on erilaisia suojalaitteita lähes jokaisella sähkömoottorilla, joiden avulla huomataan kyseisen koneen rikkoutuminen. Suojalaitteina toimivat moottoreiden sisäiset suojat ja keskuksiin asennettavat lämpöreleet. Nämä suojaukset eivät pysty havainnoimaan vikoja, jotka vaikeuttavat sähkömoottorien toimintaa. Suojien tehtävänä on huomata vain koneen rikkoutuminen. Taajuusmuuttajakäyttöiset sähkömoottorit poikkeavat muista suojauksista siinä, että ne pystyvät havainnoimaan moottoreiden ottamia ylivirtoja. Ylivirrat viittaavat moottoreiden toiminnan vaikeutumiseen. [3, s. 12; 5.]

## 4 Sähkötehon mittausten teoriaa

### 4.1 Tehojen määrittely

Vaihtosähkön teho koostuu kolmesta eri tehokomponentista. Pätöteho on resistanssissa kuluva ja työtä tekevä teho, joka havaitaan kaavasta 1. Loisteho on reaktiivinen teho, ja se kuluu käämin magneettikentän synnyttämiseen. Näennäisteho on vaihtosähkön virran ja jännitteen tehollisarvoinen tulo. Näennäisteho on myös loistehon ja pätötehon neliöllinen summa (kaava 2). Näiden kolmen tehon suhteiden mukaan kaikki sähkölaitteet tekevät työtä. Mitä paremmin pystytään mitoittamaan näiden tehojen tarpeet, sitä parempaan hyötysuhteeseen päästään.

$$P = RI^2 \quad (1)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2)$$

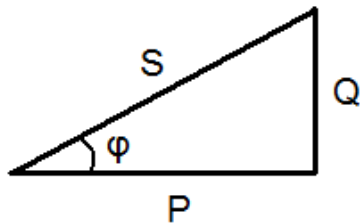
Pätötehon sähköenergian siirtyy sähkölähteestä pysyvästi kulutuskojeeseen. Pätötehon yksikkö on watti (W). Kulutuskojeen tekemä työ on siis lähes kokonaan pätötehoa. Toisaalta kaikki koneessa olevat tehohäviöt ovat myös pätötehoa, sillä pätöteho tuottaa lämpöä (kaava 1). Laitteet kuten lämmityspatterit, kiukaat ja hellat toimivat täysin pätöteholla. Pätöteho voidaan laskea myös tehokertoimen avulla (kaava 3).

$$P = UI \cos \varphi = UI_p \quad (3)$$

Loisteho heilahtelee sähkölähteen ja kulutuskojeen välillä, mutta se ei tee työtä. Loistehon yksikkö on vari (VAr). Sähkökoneet, joissa on käämejä eli induktansseja kuluttavat loistehoa. Tällaisia laitteita ovat muun muassa sähkömoottorit, muuntajat ja kuristimet. Näissäkin laitteissa työn tekee pätöteho, mutta ne eivät pysty toimimaan ilman loistehon synnyttämää magneettikenttää. Loistehon voi myös laskea tehokertoimen avulla (kaava 4). Ihanteellista piiriä tarkasteltaessa loistehoa kuluu, jos ainoana komponenttina on kondensaattori tai käämi. Erona näillä kahdella on vain se, että komponentin ollessa kondensaattori loisteho on täysin kapasitiivista ja komponentin ollessa käämi loisteho on täysin induktiivista.

$$Q = UI \sin \varphi = UI_q \quad (4)$$

Pätö- ja loisteho yhdessä muodostavat näennäistehon (kuva 2). Tehokolmion näennäis- ja pätötehon välisen kulman avulla saadaan tehokerroin (kaava 5). Näennäisteho on aina suurempi kuin pätöteho, sillä näennäistehoon kuuluu myös loistehossa tuhlaantunut teho. Näennäistehon yksikkö on voltiampeeri (VA). Kokonaisvirta (kaava 6) koostuu pätö- ja loiskomponenteista. Kokonaisvirran avulla saadaan laskettua näennäisteho (kaava 7), jos jännite tiedetään. Näennäistehoa voidaan ajatella sähköverkon maksimitehona, jolloin sitä käytettäessä komponenttien mitoittamisessa voidaan varmistua, että osia ei tule ali- tai ylimitoitettua. Näitä osia ovat muun muassa muuntajat, kytkinlaitteet ja kaapelit. [6, s. 198 - 203; 7, s. 17; 8, s. 133.]



Kuva 2. Tehokolmio [6, s. 203]

$$\cos \varphi = P/S \quad (5)$$

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (6)$$

$I_p$  on virran pätökomponentti

$I_q$  on virran loiskomponentti

$$S = UI \quad (7)$$

Tehokerroin on pätötehon ja näennäistehon suhde (kaava 5). Tehokerroin voi saada arvot nollasta yhteen. Kuten edellä olevista kaavoista huomataan (kaava 3 ja 4) tehokertoimen avulla voidaan nopeasti ratkaista virtapiirissä esiintyvät tehot. Tehokerroin  $\cos \varphi$  voidaan muuntaa vaihekulmaa esittävään muotoon yksinkertaisella trigonometrian kaavalla. Tehokertoimen avulla voidaan havaita heti sähkölaitteesta, tarvitseeko se loistehoa.  $\cos \varphi$  ollessaan arvossa yksi huomataan sähkölaitteen tarvitsevan vain pätötehoa. Toisin sanoen  $\cos \varphi$  kuvastaa loistehontarvetta. [6, s. 179, 198 - 203; 8, s. 133.]

## 4.2 Sähköenergia

Sähköenergia on sähkötehoa aikayksikössä. Energia kuvaa työmäärää tietyssä ajassa. Sähköteho saadaan, kun näennäisteho kerrotaan työtä tehdyllä ajalla (kaava 8). Näennäisteho mukaan laskettaessa saadaan lausekkeen yksiköksi volttilampepeerisekunti (VAs), joka voidaan muuttaa suoraan wattisekunneiksi (Ws) (kaava 9), jos kuorman vastus on täysin resistiivinen. Wattisekunti (Ws) on hyvin pieni yksikkö sähkönkulutuksessa, joten tätä yksikköä on muokattu käytännöllisempään muotoon. Sähköenergian laskutuksessa käytetään yksikköä kilowattitunti (kWh), joka käytännössä on 3,6 miljoonaa wattisekuntia.

$$W_s = St = UI t \quad (8)$$

$$W = Pt = UI \cos \varphi t \quad (9)$$

Sähköenergian laskutuksessa on myös mukana tietenkin kulutetun loistehon osuus. Sähkøyhtiöillä on erilaisia kantoja loistehonkuluttamiseen, kuitenkin loistehon tuottaminen verkkoon on poikkeuksetta kiellettyä. Fortum ottaa kantaa loistehomaksuihin siten, että kuukauden aikana loistehohuippu saa olla maksimissaan 20 prosenttia pätötehuipusta. Tämän rajan ylittyessä asiakasta aletaan laskuttaa loistehosta. Suuremmat sähkönkuluttajat maksavat kuitenkin loistehomaksua jokaisesta kulutetusta kilovaritunnista (kVARh) (kaava 10).

$$W_q = Qt = UI \sin \varphi t \quad (10)$$

[6, s. 204; 9, s. 29; 10.]

### 4.3 Sähkön laatu

#### Loistehon kompensointi

Loisteho eli reaktiivinen teho on pyöriville sähkökoneille välttämätöntä. Loistehoa ei voi siis kokonaisuudessaan poistaa sähkötehoja tarkasteltaessa, mutta sitä voidaan kompensoida eri keinoin. Loisteho aiheuttaa johtoihin ja muuntajiin niiden normaalissa käytössä jännite-, virta- ja tehohäviöitä. Tästä seuraa se, että mitä enemmän ylimääräistä loistehoa siirretään sähköverkossa, sitä vähemmän pätötehoa voidaan siirtää. Loistehotarpeen ja loistehotuotannon tulisi siis kohdata mahdollisimman tarkkaan.

Kompensointimenetelmiä pohdittaessa on otettava huomioon seuraavat seikat:

- kompensointi on ryhmäkohtainen, laitekohtainen tai keskitetty
- esiintyykö verkossa kapasitiivista vai induktiivista loistehoa
- mihin jännitetasoon kompensointi tulee, ja halutaanko yliaaltosuodatusta
- käytetäänkö aktiivi- vai passiivikomponentteja.

Loistehonkompensoinnilla tarkoitetaan menetelmää, jonka avulla vältytään siirtämästä perustaaajuista loistehoa sähköverkosta. Kompensointikondensaattori tuottaa kapasitiivista loistehoa tarvittavan kohteen ominaisuuksien mukaan aivan kuorman läheisyydessä. Kompensointikondensaattoreita löytyy 2,5 - 100 kVAR:n pienjänniteolosuhteisiin. Ne toimivat yleensä 400 V:n, 525 V:n tai 690 V:n jännitteillä. Normaalisti kompensointilaitteisto kytketään kolmeen vaiheeseen joko tähti- tai kolmiokytkennällä.



Kompensaatiolaitteena pienjänniteverkossa voi toimia automaattikaparisto, joka ohjautuu itsenäisesti loistehontarpeen mukaan. Automaattikapariston ohjaus tapahtuu yleensä mittaamalla syötöstä virtamuuntajan avulla loistehotarvetta. Kompensaatiolaitteiston mittausta havaitsee, paljon loistehoa tarvitaan, jonka jälkeen se kytkee tarvittavan määrän kondensaattorikennoja verkkoon. Muita laitteistoja loistehojen hallitsemiseen ovat

- rinnakkaiskondensaattoriparistot - keskijännitteellä ja keskitettyyn kompensointiin, jossa ei ole paljoa yliaaltoja
- sarjakondensaattoreita käytetään voimalinjojen siirtokapasiteetin lisäämiseen
- estokelaparistoja yliaaltopitoisiin verkkoihin (kondensaattori ja kuristin sarjassa).

Kompensointitarvetta voidaan siis määrittää laskennallisesti. Tiedettäessä nykyinen ja haluttu tehokerroin, kompensointitarve voidaan määrittää kaavan 11 mukaisesti:

$$Q = (P/e)(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (11)$$

$e$  on hyötysuhde

$\tan \varphi_1$  on tehokulma ennen kompensointia

$\tan \varphi_2$  on tehokulma kompensoinnin jälkeen.

Kun määritetään keskusten ja yksittäisten kulutuslaitteiden loistehon tarvetta, käytetään tehokerroin- tai loistehomittaria. Pitempiaikainen kuormitusten seuranta tehdään piirturilla tai teho- ja energia-analyssaattorilla, jossa on muisti.

Loistehon kompensoinnilla saavutetaan monia etuja, kuten sen että kuluttaja välttyy maksamasta korkeita loistehomaksuja. Etuina on myös se, että sähköverkon siirtokyky kasvaa kuormitusvirran loiskomponentin pienentyessä. Myös kaapeleiden ja kiskostojen lämpötilat laskevat kuormitusvirtojen pienentyessä, sillä johteissa syntyvät tehohäviöt kasvavat virran neliöön (kaava 1, ks. s. 8). Lisäksi sähköverkon jännitteen alenema pienenee, koska kuormitusvirrat pienenevät.

Energiayhtiöt sallivat yleensä noin 15–25 prosentin loistehon osuuden koko kuukauden aikana mitatusta pätötehosta. Loistehomaksun suuruuden määrää verkkoyhtiö. Loisteho mitataan kuluttajan liittymässä esimerkiksi pätötehoa ja loistehoa mittaavalla yhdistelmämittarilla. [7, s. 18; 8, s. 133 - 134; 11, s. 20 - 21, 48 - 54.]

### Harmoniset yliaallot

Ideaalisessa tapauksessa sähköverkosta otettava ja sinne palautettava virta on täysin sinimuotoista. Todellisuus on kuitenkin erilainen. Verkon sinimuoto häiriintyy lähinnä verkkoon kytkettyjen epälineaaristen kuormitusten takia. Jännitteet säröytyvät, kun kuormat ottavat verkosta tai tuottavat verkkoon epälineaarisia virtoja. Verkon ja laitteiden väliset resonanssi-ilmiöt voivat jossain tapauksessa suurentaa yliaaltoja.

Epäsymmetriset kuormitukset tuottavat verkkoon yliaaltovirtoja eli perustaajuuden monikertoja. Suomen sähköverkossa käytetään perustaajuutena 50 Hz, joten tämän taajuuden monikerrat ovat ns. harmonisia yliaaltoja ( $n \times 50 \text{ Hz}$ ). Verkon säröytyessä verkosta voi löytyä myös epäharmonisia yliaaltoja, jotka poikkeavat 50 Hz:n taajuudesta. Erityisesti kolmas harmoninen yliaalto voi olla haitallinen. Tämä kolmas yliaalto on siksi haitallinen, koska se summautuu nollajohtimessa (N). Kolmannella yliaallolla on siis jokaisen vaiheen yliaaltovirrat samanvaiheisia, joten ne kaikki summautuvat nollajohtimessa.

Nykyään yliaaltojen tuottajia on lähes joka puolella. Muun muassa energiansäästölamput, tietokoneet, televisiot, tasa- ja vaihtosuuntaajat sekä hitsauslaitteet tuottavat yliaaltoja. Loistehon kompensointiin tarkoitettavat kondensaattorit voivat sopivassa tapauksessa resonoida verkon induktanssien kanssa ja näin vahvistaa harmonisia yliaaltoja hyvinkin voimakkaiksi virtapulsseiksi.

Yliaalloista löytyy monia huonoja puolia, mutta ei ainuttakaan hyvää ominaisuutta. Yliaallot voivat muun muassa ylikuormittaa laitteita ja jopa rikkoa niitä nopeilla transientin tapaisilla virroilla. Varsinkin laitteiden kondensaattorit joutuvat koville, mitä enemmän käytettävässä sähköverkossa esiintyy yliaaltoja. Yliaallot voivat sotkea mittauslaitteiden tuloksia sekä laukaista suojaireitä ilman syytä. [8, s. 133; 11, s. 26 - 34.]

Sähkönlaatu standardi SFS-EN 50160 ottaa kantaa sallittuihin harmonisiin ylijännitteisiin:

Normaaleissa käyttöolosuhteissa, jokaisen viikon pituisen mittausjakson aikana, 95 % jakelijännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin annettu arvo (taulukko 1). Resonanssit voivat aiheuttaa suurempia jännitteitä yksittäiselle harmoniselle. [12, s. 48.]

#### Jännitteen harmoninen kokonaissärö (THD)

Jännitteen harmoninen kokonaissärö eli THD-R (Total Harmonic Distortion) on sähkön muodon arvioimiseen käytettävä kaava (kaava 12, ks. seur. s.). THD-R arvo on harmonisten ylijännitteiden määrä suhteessa jännitteen tehollisarvoon. Sähkön laatustandardi SFS-EN 50160:ssa neuvotaan ottamaan huomioon 25 harmonista yliaaltoa, jos kyseessä on normaali tarkastelu (taulukko 1). [11, s. 29; 12, s. 48.]

| Parittomat yliaallot  |   |                    |   | Parilliset yliaallot |   |
|---|---|--------------------|---|----------------------|---|
| Kolmella jaottomat  |   | Kolmella jaolliset |   |                      |   |
| Järjestysluku<br>h  | Suhteellinen<br>jännite<br>U <sub>h</sub> | Järjestysluku<br>h | Suhteellinen<br>jännite<br>U <sub>h</sub> | Järjestysluku<br>h   | Suhteellinen<br>jännite<br>U <sub>h</sub> |
| 5   | 5 %                                       | 3                  | 3 % #                                     | 2                    | 1,90 %                                    |
| 7   | 4 %                                       | 9                  | 1,30 %                                    | 4                    | 1,00 %                                    |
| 11  | 3 %                                       | 15                 | 0,50 %                                    | 6...24               | 0,50 %                                    |
| 13  | 2,50 %                                    | 21                 | 0,50 %                                    |                      |   |
| 17  | harkittavana                              |                    |   |                      |   |
| 19  | harkittavana                              |                    |   |                      |   |
| 23  | harkittavana                              |                    |   |                      |   |
| 25  | harkittavana                              |                    |   |                      |   |
| HUOM. 1 Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä, mutta hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi. |   |                    |   |                      |   |
| HUOM. 2 Kolmella jaottomat harmoniset, järjestysluvultaan suuremmat kuin 13, ovat harkinnan alaisina.   |   |                    |   |                      |   |
| HUOM. 3 Jossakin maissa harmonisten sallitut raja-arvot ovat jo voimassa.   |   |                    |   |                      |   |
| # Verkon rakenteesta riippuen kolmas yliaalto saattaa olla huomattavasti pienempi.  |   |                    |   |                      |   |

Taulukko 1. SFS-EN 50160 - Harmoniset yliaallot [12, s. 48]

$$THD - R = \frac{\sqrt{\sum_{2,3,\dots}^{\infty} (U_h)^2}}{U} \quad (12)$$

$U$  on koko jännitteen tehollisarvo

$U_h$  on kyseessä olevan yliaaltojännitteen tehollisarvo

### Jännite-epäsymmetria

Jännite-epäsymmetria eli vinokuormitus on vaiva isoissa teollisuusverkoissa. Jännite-epäsymmetria johtuu yleensä verkon epäsymmetrisestä kuormittamisesta. Jännite-epäsymmetriaa lisää myös se, että asentajat asentavat yleensä yksivaiheisia sähkölaitteita ensimmäiseen vaiheeseen (L1). Jännite-epäsymmetria aiheuttaa nollajohtoon (N) kuormitusta. Yhden vaiheen pääsulakkeen palaminen pudottaa verkosta yhden vaiheen. Tämä tapaus on kuitenkin teollisuuskiinteistöissä lähes mahdotonta symmetrisien laitteiden ansiosta. Kotitalouksissa tilanne on mahdollinen, mutta hyvin harvinainen.

Suuritehoiset kolmivaiheiset kulutuslaitteet ovat jo laitteen sisällä tehty jännite-symmetrisiksi. Täysin jännite-symmetrisissä asennuksissa nollajohdin (N) on virraton ja jännitteetön. Standardi SFS-EN 50160 sähkönlaadusta määrittelee jännite-epäsymmetrian. ST-kortti 52.51.04 määrittää vinokuormitus-suosituksen, joka on  $\pm 10$  %. Tämä lukema tarkoittaa sitä, että kunkin vaiheenvirta tulisi poiketa enintään  $\pm 10$  % vaihevirtojen keskiarvosta. Suuremmat jännite-epäsymmetriat vaativat nollajohtimen (N) poikkipinta-alan kasvattamista ja huonossa tapauksessa vinokuormitus voi rikkoa sähkölaitteita [12, s. 18; 13, s. 1.]

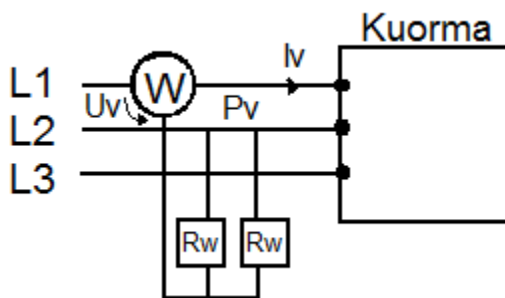
Sähkönlaatu standardissa SFS-EN 50160 otetaan kantaa sähkön ominaisuuksiin. Standardi määrää pienjännitejakelujännitteen olevan symmetrisyytensä mukaan seuraava:

Normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, jokaisen, jakelujännitteen (perustaajuisen) vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % tulee olla välillä 0...2 % (perustaajuisesta) myötäkomponentista [12, s. 26].

## 5 Sähköenergian mittaaminen

### 5.1 Tasa- ja vaihtosähkön mittaukseen käytettävät kytkennät

Sähköenergian mittaaminen tasasähköstä on kuin sähköenergian mittaaminen vaihtosähkön yhdestä vaiheesta. Samat periaatteet näihin mittauksiin pätevät kummassakin tapauksessa. Kolme tai useampivaiheiset vaihtosähköjärjestelmät vaativat monimutkaisempia mittauskytkentöjä. Mittauskytkennät muuttuvat vieläkin hiukan monimutkaisemmiksi, jos virrat tai jännitteet nousevat liian suuriksi. Erikoismittauskytkentöjä tehtäessä voidaan mittaukseen luoda keinotekoinen nolla-potentiaali. Keinotekoinen nolla-potentiaali on menetelmä, jonka avulla saadaan mitattua kolmivaiheinen symmetrinen teho yhdellä tehomittarilla, jos nollajohdinta ei ole käytössä (kuva 3). Kytkentään tarvittavat  $R_w$ -vastukset ovat yhtä suuria kuin  $W$ -mittarin sisäresistanssi. Kuitenkin mittauskytkentöjä tehtäessä on muistettava, että parhaat ohjeet mittarin asentamiseen tulee mittarin laitevalmistajalta.



Kuva 3. Keinotekoisien nollapisteen muodostaminen tehoa mitattaessa [9, s. 90].

Täysin resistiivisiä kuormia (kuten hehkulamput ja lämmitysvastukset) mitattaessa eräät mittauskytkennät sopivat niin vaihtosähkön kuin tasasähkön mittaukseen. Tässä tapauksessa vaihtosähköstä tarkastellaan vain yhden vaiheen toimintaa. Näitä mittauksia ovat virran-, jännitteen- ja pätötehon mittaus. Mittauksen kuorma on täysin resistiivinen, eli virtapiirissä ei kulu muuta kuin pätötehoa. Yleensä sähkömittauksissa on kuitenkin kyse jostain muusta kuin täysin resistiivisestä kuormasta. Tällöin piirin kokonaisteho on näennäisteho, jossa pätöteho ja loisteho jakautuvat tilanteesta riippuen. Loisteho voi olla induktiivista tai kapasitiivista kuormasta riippuen.

Mitattaessa niin sanotusti suoralla mittauskytkennällä mittaus suoritetaan siten, että kaikki sähkövirta johdetaan sellaisenaan virtamittauksen läpi ja jännitemittaus otetaan virtapiirin halutun tarkasteluvälin potentiaalieropisteiden välistä. Suorassa mittauskytkennässä on etuna sen helppo asennettavuus ja taloudellisuus. Suorassa mittauksessa kilowattituntimittarin (kWh-mittari) kilpitietojen tulee vastata mittauskohteen liitännätarhoarvoja. Tätä kytkentäperiaatetta voidaan käyttää sähköenergiaa mitattaessa aina 63 A:n pääsulakkeiden kokoon asti. Tämän suurempaan sähköenergian mittauksessa mentäessä siirrytään epäsuoraan mittaukseen.

Epäsuorassa mittauskytkennässä käytetään ulkopuolisia komponentteja siten, että näillä laitteilla saadaan virta- ja jännitearvo haluttuun arvoon. Tällaisia laitteita ovat pääasiassa virtamuuntajat ja joissain tapauksissa myös jännitemuuntaja. Virta- ja jännitemuuntajan toimintaan perehdytään myöhemmin työssä. Sähköenergiaa mitattaessa on oltava tarkkoja virta- ja jännite muuntosuhteiden parametroidista kWh-mittariin, koska väärän virtamuuntajan muuntosuhteen asettaminen kWh-mittariin voi pienentää sähkölaskua murto-osaan oikeaan verrattuna. Pienjännitealueella toimittaessa tulee harvoin sellaisia virtoja ja jännitteitä, että sähköenergiamittauksessa tarvittaisiin turvautua virta- tai jännitemuuntajiin. Nyrkkisääntönä pienjännitealueella mitattaessa mitausjohtimina käytetään 2,5 mm<sup>2</sup>:n kuparijohdinta. [9, s. 89 - 95; 14, s. 25.]

#### Yksivaihetehon mittaus

Yksivaiheinen tehon mittaus tapahtuu tehomittarilla (W-mittari). W-mittariin kytketään jännite sekä virta. Tehomittari mittaa pätötehoa mitattavasta virtapiiristä. Yhdellä W-mittarilla voidaan mitata yhdessä vaiheessa kulkevaa pätötehoa. On kuitenkin huomiotava, että jos virtapiirissä on mukana loistehoa mittaus voi vääristyä.

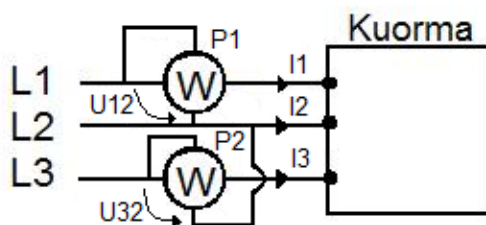
W-mittarilla mitattaessa pätötehoa kolmivaiheisessa kolmiokytkennässä (D-kytkentä) mittaus voidaan suorittaa keinotekoisella nolla-potentiaali -mittauskytkennällä. Tämä kytkentä on esitetty kuvassa 3 (ks. ed. s.). [9, s. 90.]

## Kolmivaihetehon mittaus

Symmetrisen kolmivaihekuormituksen tapauksessa verkon kokonaisteho voidaan mitata yhdellä W-mittarilla. Tässä tapauksessa oletetaan, että kaikissa vaiheissa kulkevat samat tehot, joten yhden vaiheen teho kerrotaan vain kolmella ja näin saadaan kokonaispätöteho.

Kun kolmivaihetehoa mitattetaan siten, että kuormitus on tähtikytkentäinen (Y-kytkentä), ovat vaiheiden kuormitukset toisistaan riippumattomia ja usein myös epäsymmetrisiä. Silloin kokonaistehon selville saamiseksi on mitattava jokaisen vaiheen teho ja summattava ne kokonaistehoksi. [9, s. 90 - 92.]

Kolmivaihetehoa voidaan mitata Aaron-kytkennällä (kuva 4) riippumatta, onko kuormitus symmetrinen vai epäsymmetrinen. Kytkennässä ei ole mukana nollajohdinta. Aaron-kytkentä toimii myös samalla tavalla tähti- ja kolmio-kytketyissä (Y- ja D-kytketyissä) laitteissa. Tällöin kokonaisteho on P1:n ja P2:n summa. Mittauskytkennän heikkouksia on se, että jos vaihesiirto on jännitteen ja virran välillä yli 60° induktiivisella kuormalla, tällöin P1:n näyttämä on negatiivinen. Vastaavasti jos kuorma on vaihesiirroltaan suurempi kuin 60° kapasitiivinen, on P2:n näyttämä negatiivinen.



Kuva 4. Aaron-kytkentä [9, s. 91].

## Loistehomittaus

Symmetrinen kolmivaiheinen loisteho voidaan mitata yhden W-mittarin avulla, kun mittariin kytketty jännite otetaan eri vaiheista kuin mittarin läpi kulkeva virta. Kolmivaiheinen loisteho saadaan silloin kertomalla saatu loisteho  $\sqrt{3}$  (kaavat 13 ja 14).

$$Q_w = UI \sin \varphi \quad (13)$$

$$Q = \sqrt{3}Q_w \quad (14)$$

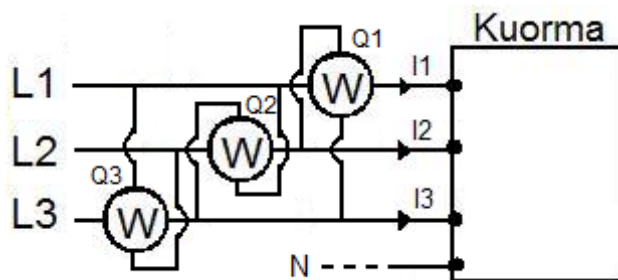
Toinen tapa loistehon mittaukseen on ottaa mittaukseen sähködynaaminen mittari (varimittari). Sähködynaaminen mittari vaatii toimiakseen nollavaiheen (tähtikytkentä). Tällöin mittari kytketään yhteen vaiheeseen, jolloin tämän vaiheen virta kulkee mittarin läpi. Jännite mittarille otetaan saman vaiheen ja nollan väliltä. Tällöin mittaustulos kerrotaan kolmella (kaava 15).

$$Q = 3Q_v \quad (15)$$

jossa  $Q_v$  on yhden vaiheen loisteho

Kolmen W-mittarin avulla on mahdollista mitata kolmivaihekuorman loisteho, olkoonpa kuormitus epäsymmetrinen tai symmetrinen (kuva 5). Kuormitus voi olla nollajohtimellinen tai ilman nollaa. Kolmivaihekuorman loisteho saadaan laskemalla mittareiden osoitukset yhteen ja jakamalla summa  $\sqrt{3}$ :lla (kaava 16). [9, s. 93 - 95.]

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{\sqrt{3}} \quad (16)$$



Kuva 5. Kolmivaihekuorman mittauskytkentä [9, s. 95].



## 5.2 Verkkoanalysaattori

Energianhallintajärjestelmän tärkeimpänä osana tässä projektissa toimii kuvassa 6 esitetty Siemens Sentronpac3200 -verkkoanalysaattori. Verkkoanalysaattori on projektissa käytettävä mittalaite. Kyseinen verkkoanalysaattori päätyi projektin mittalaitteeksi vertailuiden ja tarjouskilpailun jälkeen. Energianhallintajärjestelmään tulee yhteensä 47 mittauspistettä, joita mitataan juuri Siemens Sentronpac3200 -verkkoanalysaattorilla. Täydellä kapasiteetilla toimiessaan verkkoanalysaattori voi ilmaista sähköstä 38 erilaista mitta-arvoa. Verkkoanalysaattori on yhteensopiva Modbus TCP/IP ja Profibus automaatioprotokollien kanssa. Verkkoanalysaattori on yhteensopiva Modbus TCP/IP ja Profibus automaatioprotokollien kanssa. Verkkoanalysaattori on kompaktinkokoinen (96 mm x 96 mm), ja se on helppo asentaa pieniin tiloihin.

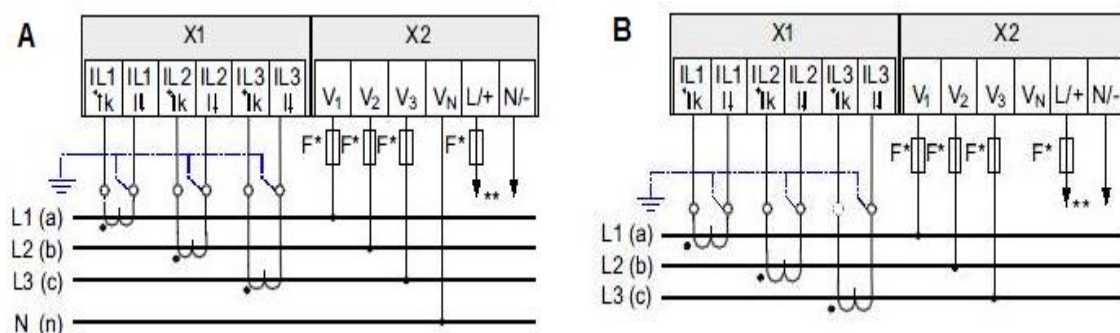


Kuva 6. Siemens Sentronpac3200 -näyttö

Sentronpac3200 -verkkoanalysointilaite on joustava mittalaite. Sen ohjausjännite sopii lähes mihin tahansa pienjänniteverkkoon. Jännitekestoisuus ohjausjännitteessä on 690 V ( $U_{I\text{ MAX}}$ : 600 V). Se voidaan liittää joko x/1 A:n tai x/5 A:n virtamuuntajiin. Analysointilaite on integroitu Ethernet-liittymä, joten kuparijohtimen yhteyden asennus on helppoa. Automaatioprotokollan valinta ei ollut varmistunut, ennen kuin tarjouskilpailutuksen tulokset tulivat. Siemens Sentronpac3200 -verkkoanalysointilaite tukee Modbus TCP/IP:tä, joka on energianhallintajärjestelmän automaatioprotokolla.

Sentronpac3200 -verkkoanalysaattori valittiin projektiin, koska se pystyy mittaamaan tärkeitä suureita sähköstä. Siitä huolimatta, että suunnitellun projektin mukaan analysaattori lähettää vain 23 eri mittaustietoa järjestelmään, joista kaksi tärkeintä mittatietoa tallentuu muistiin, voidaan verkkoanalysaattorin omasta näytöstä selailla muita mitta-arvoja. Näiden mittaustietojen perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä analysaattorin luona siitä, onko analysaattorin kattavassa laitteistossa jotain vikaa. Näitä tuloksia kertovat esimerkiksi jännite- tai virtasymmetrisyysmittaukset. Virran epätasainen jakautuminen voi kertoa moottorin jonkin käänin liiallisesta kulumisesta.

Verkkoanalysaattorin mittauskytkennäksi valittiin analysaattorin laaja-alaisin kytkentä. Jännitetasojen ollessa pienjännitettä analysaattori on kytketty seuraavalla tavalla mitauspisteessä (kuva 7 ja kuva 8, ks. seur. s.). Verkkoanalysaattoria kytkettäessä virranmittaus tapahtui virtamuuntajien kautta ja jännitteet suoraan mitattaessa. Kumpaa tahansa kytkentää käytettäessä kuorma voi olla symmetrinen tai epäsymmetrinen. [5, s. 19 - 31, 82 - 90.]



Kuva 7. Verkkoanalysointorin kytkentä: A. Nollajohtimen kanssa, B. Ilman nollajohtinta [5, s. 83 - 85].



Kuva 8. Verkkoanalysointilaitteen kytkentä käytännössä

### Virtamuuntaja

Virtamuuntaja on hyvin usein sähkövoimatekniikan mittauksissa käytettävä lisä (kuva 9). Virtamuuntajan tehtävänä on pienentää mitattavan virran arvo murto-osaan todellisesta virrasta. Projektissa käytettiin 100/5 A:n virtamuuntajista aina 2 500/5 A:n virtamuuntajiin. Virtamuuntajia käytetään virranmittauksessa, jossa mitattavan virtapiirin pääsulakkeiden koko on yli 63 A. Tätä pienemmillä virroilla mittausta tehdään suoralla mittauskytkennällä, eli mittausvirta kulkee mittalaitteen läpi.



Kuva 9. 400/5 A:n virtamuuntajia

Virtamuuntajat mitoitetaan siten, että jos ensiövirta kasvaa liian suureksi niin virtamuuntajan rautasydän alkaa kyllästyä, mikä taas rajoittaa toisiovirran kasvun. Tämä ilmiö suojaa mahdollisesti hyvinkin herkkää mittalaitetta vaurioitumiselta. Virtamuuntajan toisiota ei saa koskaan jättää auki, kun ensiöpiirissä kulkee virta, sillä silloin voi toisiokäämiin indusoitua hyvin suuri, jopa hengenvaarallinen jännite, joka voi aiheuttaa läpilyönnin sekä virtamuuntajan kuumenemisen ja tuhoutumisen. Tästä syystä virtamuuntajan toisiopiirissä ei saa myöskään olla sulakkeita tai tavallisia kytkimiä.

Virtamuuntajia löytyy siten, että ensiövirran arvot ovat 5 A:n ja 6 000 A:n välillä. Toisiovirta-arvoja on 1 A:n, 2 A:n suuruisia, mutta yleisin on kuitenkin 5 A:n virtamuuntaja. 1 A:n ja 2 A:n virtamuuntajia käytetään erikoistapauksissa ja todella tarkoissa mittauksissa. Virtamuuntajien tarkkuusluokat ovat 0,1 %; 0,2 %; 0,5 % ja 1,0 %, jotka kertovat virtamittauksen virheen suuruuden. Useimmiten virtamuuntaja valitaan siten, että virta vastaa 25 - 100 % virtamuuntajan ensiön nimellisvirrasta. [6, s. 296 - 297; 9, s. 83 - 85; 14, s. 19; 15, s. 316.]

#### Jännitemuuntaja

Jännitemuuntajia käytetään mittauksen apuvälineenä vasta suurjännitteisiin siirryttäessä. Suurjännite on yli 1 000 V AC tai 1 500 V DC. Tavallisesti pienemmillä jännitteillä jännitteet mitataan suoralla mittauskytkennällä. Projektissa ei käytetä verkkoanalysaattoreiden mitta-antureina jännitemuuntajia, sillä kaikki mittapisteen ovat pienjännitteisiä. [9, s. 82.]

## 6 Energianhallintajärjestelmän suunnittelu ja toteutus

### 6.1 Energianhallintajärjestelmän suunnittelu

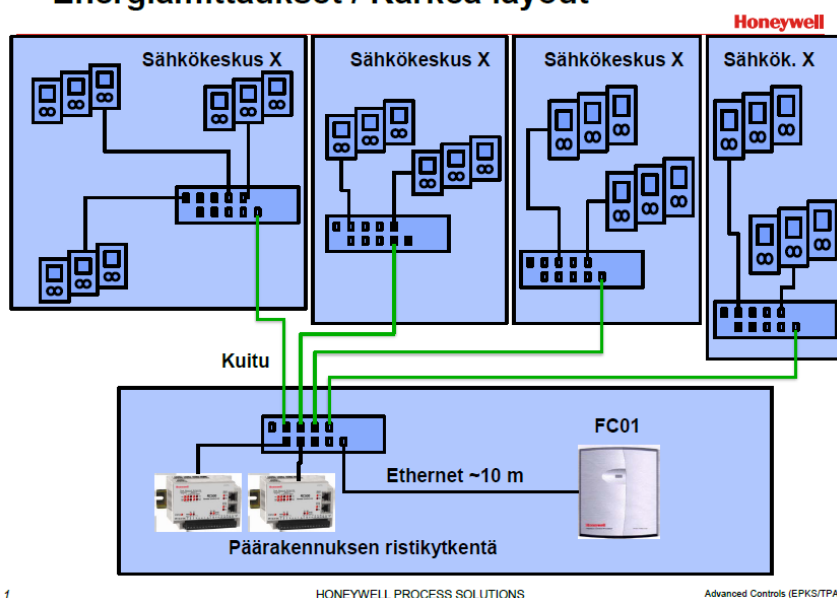
25.1.2012 pidetyn automaatioverkkopalaverin aiheena oli energianhallintajärjestelmän tiedonsiirtoverkko. Tässä palaverissa oli mukana eri yritysten edustajia tiedonsiirtoverkon toteutusehdotuksien kanssa. Alkuperäisinä vaihtoehtoina oli toteuttaa tiedonsiirto joko valokuitujen tai kuparikaapeleiden avulla tai langattomasti WLAN-tekniikan avulla. Toisena avainkysymyksenä palaverissa oli, mihin liitäntäpiste mittaustilassa kuituyhteyden osalta luodaan. Palaverin tarkoituksena oli saada kummastakin tiedonsiirtoverkosta ja sen toteutuksesta tarjousehdotus.

Kuituverkkojärjestelmän hyvinä puolina olivat sen toimintavarmuus, hyvin nopea tiedonsiirto sekä vähäinen häiriöiden kytkeytyminen. Huonoina puolina järjestelmässä taas pidettiin sen toteutuskustannuksia, koska fyysiset kaapelit vaativat kaivetun kaapeliojan.

WLAN-tekniikka eli lähiverkkoyhteys oli toisena tiedonsiirtoverkon tarjoajana. Tässä menetelmässä jätevedenpuhdistuslaitokselle olisi tehty yksi tukiasema, joka kerää tietoa ympäri laitosta. Verkkoanalysointilaitosten tihentymiseen olisi tehty pienempi kuparikaapelitiedonsiirtoverkko, johon voisi kuulua esimerkiksi viisi verkkoanalysointilaitetta. Nämä verkkoanalysointilaitteet lähettäisivät tietyin väliajoin mittaustietoja WLAN-lähettimelle, joka sitten taas siirtäisi tiedot tukiasemalle ja sitä kautta energianhallintajärjestelmään. Tässä menetelmässä hyvinä puolina olivat pienemmät kokonaisjärjestelmän rakennuskustannukset sekä asennuksen vaivattomuus. Huonona taas pidettiin yhteyksien toimintavarmuutta sekä häiriöiden vaikutusta lähetyksiin. Pienen harkinnan jälkeen päätettiin kuituverkkojärjestelmään, sillä lähes jokaiseen tulevaan mittauspisteeseen oli jo entuudestaan olemassa yksi- tai monimuotovalokuituyhteys.

27.1.2012 pidetyssä palaverissa suunniteltiin energianhallintajärjestelmän päätteen visualisoinnin perustukset ja verkkoanalysaattoreilta mitattavat suureet järjestelmään. Palaverissa pyydettiin tarjoustä Honeywell-yritykseltä tietojen siirtämisestä logiikalta järjestelmään sekä energianhallintajärjestelmän ohjelmointia. Järjestelmässä käytettävä verkkoanalysaattori Siemens Sentronpac3200 pystyy mittaamaan 38 erilaista mitta-usrvoa. Näiden kaikkien mittaustietojen siirto vaatisi massiivisempaa kuituverkkojärjestelmää ja monia lisäkortteja käytettävään logiikkaan. Näiden tietojen pohjalta Honeywell-yrityksen edustajat laativat alustavan suunnitelman automaatioverkon toteutukselle (kuva 10). Automaatioprotokollan valinnassa päästiin siihen vaiheeseen, että valinta oli tehtävä Modbus TCP/IP- ja Profibus -protokollien väliltä.

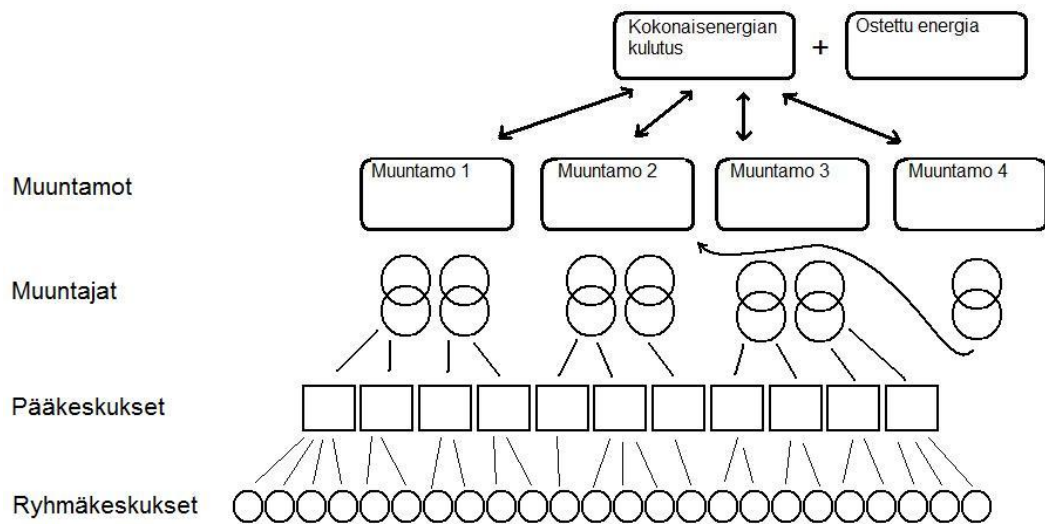
### Energiamittaukset / Karkea layout



Kuva 10. Suunnitelma automaatioverkon toteutuksesta [Honeywell]

Alkuperäisenä ajatuksena energianhallintajärjestelmän visuaalisesta toteutuksesta oli tehdä niin sanottu puurakenne. Kuvassa 11 (ks. seur. s.) on puurakenne eli nimensä mukainen rakenne, jossa ylimpänä näkyy koko laitoksen energiankulutus omassa solussaan ja vieressä esitetään ostoenergian osuus. Tästä järjestelmä haarautuu aina pienempiin ja pienempiin kokonaisuuksiin. Kokonaiskulutuksen jälkeen tulisivat alempana muuntamot 1 - 4. Näiden alapuolelle tulisivat jokaisen muuntamon muuntajat ja näiden alapuolelle pääkeskukset sekä ryhmäkeskukset. Verkkoanalysaattorit ovat sijoiteltu pääosin joko pääkeskus- tai ryhmäkeskus-tasolle. Järjestelmän tulisi toimiessaan summata aina ylöspäin mentäessä eri keskustasojen kokonaiskulutukset.





Kuva 11. Puurakennesuunnitelma

Poikkeuksen järjestelmän puurakenne tekee muuntamon 4 kohdalla, koska tämä muuntamo on kaasugeneraattorin muuntamo. Kaasugeneraattori tuottaa sähköä toimiessaan, ja se syöttää sähköenergiaa laitoksen käyttöön. Kaasugeneraattori syöttää muuntamon 2 kautta tuottamansa sähkötehon laitoksen sähköverkkoon.

Täydellisen järjestelmän automaatioverkon tulisi pystyä siirtämään reaaliaikaisesti 38 arvoa jokaiselta verkkoanalysaattorilta. Todennäköisesti laitokselle tulee 47 verkkoanalysaattoria eli siirrettävien arvojen lukumääräksi tulisi 1 768. Näin suureen tiedonsiirtoon tarvittaisiin jo hyvinkin paljon suurempi automaatioverkko, mitä oli suunniteltu. Pohdittiin, mitä kaikkia näistä arvoista oikeasti tarvitaan, jotta energianhallintajärjestelmä pystyy toimimaan siinä tehtävässä, mihin se on tarkoitettu. Lopuksi valittiin seuraavat mittatiedot:

$L_1$ -,  $L_2$ - ja  $L_3$ -vaiheen ja nollapotentiaalin välinen jännite ( $U_1 - N$ ,  $U_2 - N$ ,  $U_3 - N$ )

$L_1$ -,  $L_2$ - ja  $L_3$ -vaiheiden välisiä pääjännitteitä ( $U_1 - U_2$ ,  $U_2 - U_3$ ,  $U_3 - U_1$ )

$L_1$ -,  $L_2$ - ja  $L_3$ -vaiheen virta ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ )

näennäistehon keskiarvo ( $S$ )

pätöteho keskiarvo ( $P$ )

loisteho keskiarvo ( $Q$ )

tehokerroin ( $\cos\phi$ )

Näiden suureiden perusteella pystytään lopulliseen järjestelmään johtamaan yksinkertaisien kaavojen avulla muitakin arvoja. Lopuksi päätettiin jokaisen vaiheen jännitteiden ja virtojen mittaustietojen tuomisesta järjestelmään, koska näiden avulla pystytään helposti havaitsemaan epäsymmetrinen kuormitus kulutuspisteessä. Eri tehojen summilla pystytään valmiin järjestelmän kautta havaitsemaan, jos jokin kulutuspiste kuluttaa enemmän tehoa kuin symmetrinen vastaava kulutuspiste. Tietojen avulla huomataan koneen laakerivika tai tila, jolloin laakeri on hajoamassa. Tilanteeseen osataan varautua etukäteen, mikä helpottaa laitoksen kunnossapitoa. Tehokertoimen eli eritehojen suhteiden mukaan pystytään havaitsemaan, jos jokin laite tarvitsee loistehonkompensointia.

Suunniteltujen mittausten kanssa kokonaisdataliikenteen määräksi tulisi yhteensä 611 mittaustietoa. Vaihtoehdot automaatioprotokollaksi olivat Modbus TCP/IP ja Profibus. Käytettäessä protokollaa Modbus TCP/IP rajoittavana tekijänä tiedonsiirrossa olisi järjestelmään kytkettävien laitteiden kokonaismäärä. Modbus TCP/IP oli protokollamaksuiltaan ilmainen, mutta jos sen tiedonkäsittelykapasiteetti olisi liian pieni, sitä ei voitaisi käyttää. Toisen vaihtoehdon Profibus-protokollan mukaan järjestelmän suuruutta rajoitti vain tiedonsiirron koko. Profibus pystyi käsittelemään enemmän tietoa, mutta se tarvitsisi lisäkortteja jos järjestelmä laajenisi. Profibus-protokolla oli lisenssimaksullinen ja siihen tarvittaisiin noin viisi lisäkorttia, jotta kyseiset 611 mittaustietoa saataisiin kuljetettua järjestelmään.

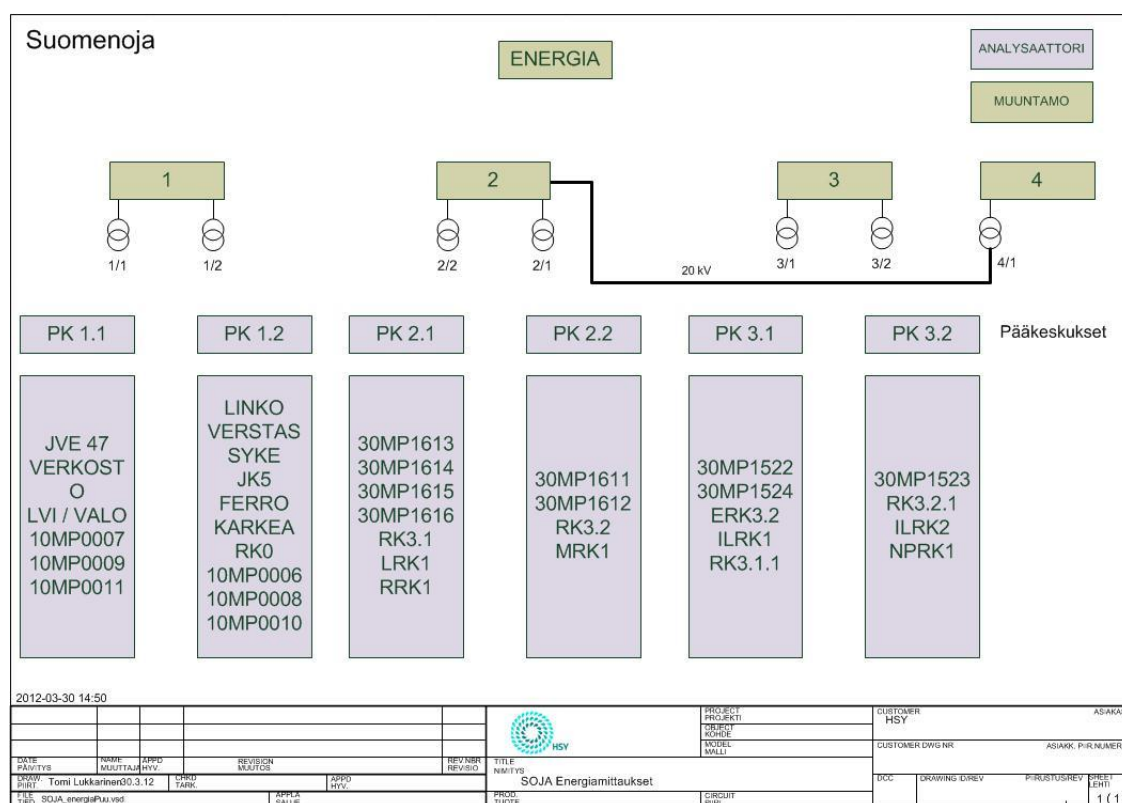
Huomioinnin arvoista oli myös se, että jos järjestelmän kokonaiskustannukset nousisivat liian suuriksi, olisi mahdollista toteuttaa vain energianhallintajärjestelmä saneerattavan pääkeskuksen osalta. Tällöin järjestelmään tulisi noin 20 verkkoanalysaattoria, joiden tiedot saatettaisiin samanlaisen logiikan kautta järjestelmän valvojalle.



## 6.2 Järjestelmän toteutus

Energianhallintajärjestelmän rakentaminen aloitettiin helmikuun loppupuolella. Järjestelmän toteutusaikataulun mukaan sitä ei saada käyttöönotettua ennen kesää 2012. Fyysiset asennustyöt ovat hyvässä vaiheessa ja lähes kaikki Siemens Sentronpac3200-verkkoanalysaattorit ovat paikoillaan niille kuuluvissa mittauspisteissä. Järjestelmän valmistumisaikataulu on hidas, koska Honeywell Oy -yrityksen toteuttama keskusjärjestelmän ohjelmointi vie paljon aikaa. Mittatietojen rajaukset sekä järjestelmän muistiin tallennettavat tiedot ovat palaverien perusteella saatu päätettyä.

Energianhallintajärjestelmän keskusvalvomon pohjan muoto ei ole muuttunut suunniteluasteelta juuri yhtään (kuva 12). Suunnitelmissa oli, että energianhallintajärjestelmän päävalikon pohjan tulisi olla kuvan 11 (ks. s. 26) kaltainen. Uusina puolina järjestelmän pääkeskus tunnusten perään ovat tulleet eritellyt mittauspisteet. Järjestelmän käyttöönoton jälkeen kunkin verkkoanalysaattorin mittaustiedot tulisi saada yksilöllisesti auki napauttamalla hiirellä haluttavan analysaattorin kuvaketta.



Kuva 12. Keskusvalvomon järjestelmän toteutuskaavio [HSY Jan Strömdahl].

Mittaustietojen osalta aikaisemmin palaverissa sovittuihin mitta-arvoihin tuli hieman muutoksia suunnittelun edetessä. Alkuperäisen suunnitelman mukaan järjestelmään tulisi 13 mittaustietoa jokaiselta verkkoanalysoitsijalta, mutta tämä luku nousi 23 mitta-arvoon. Näistä 23 mitta-arvosta vain kaksi tallentuvat takautuvasti energianhallintajärjestelmän muistiin. Nämä suureet ovat kokonaispätöteho ( $P_{\max}$ ) ja keskiarvovirta ( $I_x$ ). Muut hetkelliset mitta-arvot ovat

$L_1$ -,  $L_2$ - ja  $L_3$ -vaiheen ja nollapotentiaalin välinen jännite ( $U_1 - N$ ,  $U_2 - N$ ,  $U_3 - N$ )

$L_1$ -,  $L_2$ - ja  $L_3$ -vaiheiden välisiä pääjännitteitä ( $U_1 - U_2$ ,  $U_2 - U_3$ ,  $U_3 - U_1$ )

$L_1$ -,  $L_2$ - ja  $L_3$ -vaiheen virta ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ )

keskiarvojännite ( $U_x - N$ )

keskiarvopääjännite ( $U_x - U_x$ )

THD-R jännite  $L_1$ ,  $-L_2$  ja  $-L_3$

THD-R virta  $L_1$ ,  $-L_2$  ja  $-L_3$

kokonaisnäennäistehon ( $S_{\max}$ )

kokonaisloisteho ( $Q_{\max}$ )

kokonaistehokerroin ( $\cos\varphi$ )

taajuus ( $f$ )

## **7 Yhteenveto**

Energianhallintajärjestelmän suunnittelu Suomenojan jätevedenpuhdistamolle on ollut onnistunut projekti. Järjestelmän suunnittelu lähti käyntiin sulavasti, kun jo alusta lähtien kaikki projektin osapuolet on saatu palaverissa saman pöydän ääreen. Projektin keskivaiheilla huomattiin, että järjestelmän tietotekninen ohjelmointi sekä järjestelmän visualisointi valvomon päätteelle tulisi kestämään odotettua kauemmin.

Energianhallintajärjestelmän vaihtoehtoiset toteutusmallit tutkittiin ja lopputuloksiin oltiin tyytyväisiä. Suurimmat hankinnat saatiin kilpailutettua ja tuotteiden saavuttua asennustyöt voitiin aloittaa ripeästi. Energianmittausjärjestelmän ohessa Suomenojan jätevedenpuhdistamolla oli käynnissä muitakin isoja projekteja, mutta ne eivät haitanneet energianmittausjärjestelmän toteutusta.

Kokonaisuudessaan projekti on hyvä lisäys Suomenojan puhdistuslaitoksen järjestelmänvalvontaan ja laitekannan päivittämiseen. Järjestelmän käyttöönottoa saadaan odottaa vielä, mutta analysaattori-tasolla tarkasteltaessa verkkoanalysaattoreista on jo tässä vaiheessa saatu hyödyllistä tietoa.

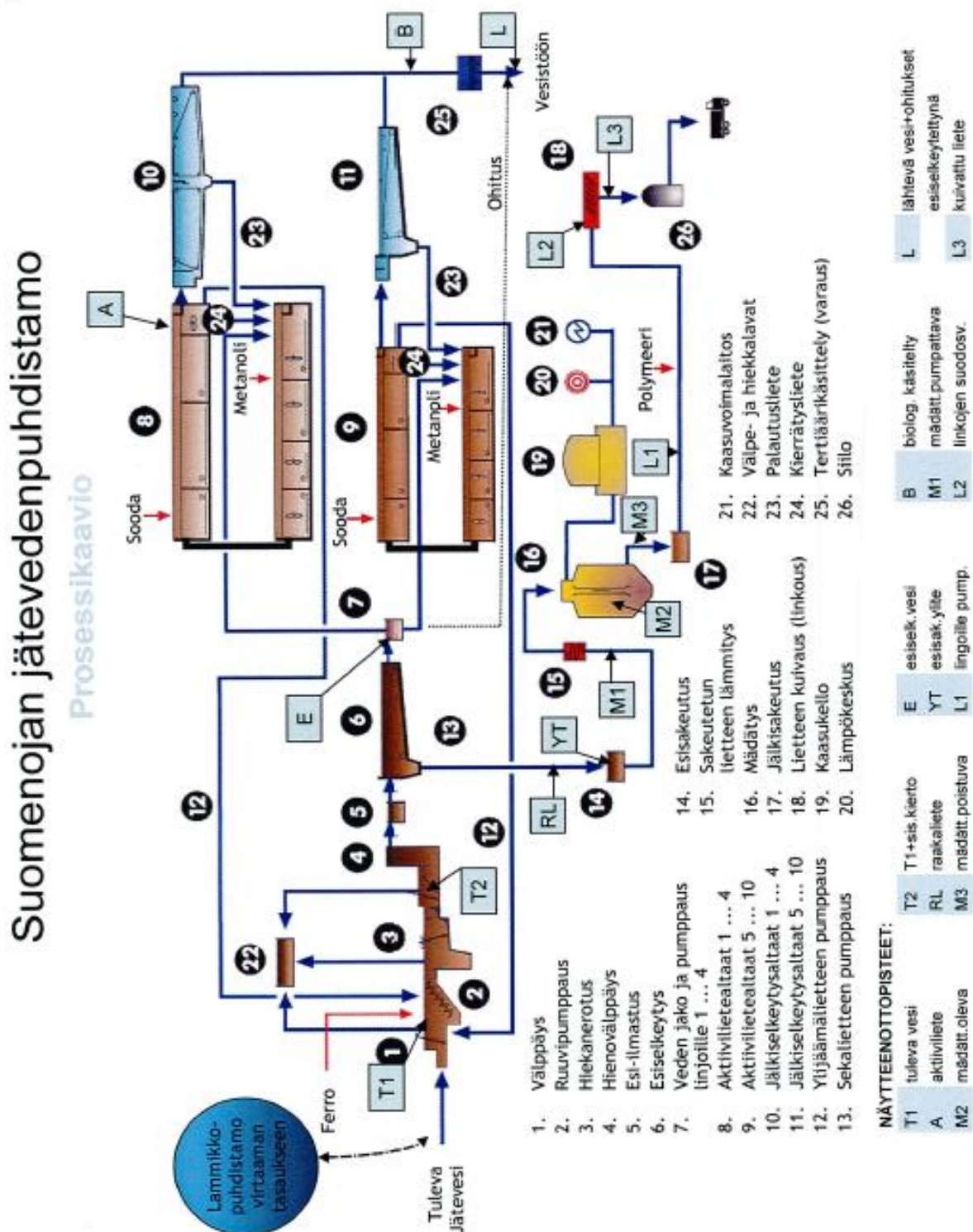
## Lähteet

- [1] HSY – ympäristötekoja toimivan arjen puolesta. 2012. Verkkodokumentti. <<http://www.hsy.fi/tietoahsy/Sivut/default.aspx>>. Luettu 1.5.2012.
- [2] Helsingin seudun ympäristöpalvelut – kuntayhtymän tilinpäätös 2010.
- [3] Lehtinen, Eija. 2011. Suomenojan jätevedenpuhdistamon toiminta vuonna 2010. HSY.
- [4] Suomenojan jätevedenpuhdistamo. Verkkodokumentti. <[http://www.hsy.fi/vesi/palvelut/jatevesi/puhdistamot/suomenoja/Documents/Kaavakuva\\_suomenoja.pdf](http://www.hsy.fi/vesi/palvelut/jatevesi/puhdistamot/suomenoja/Documents/Kaavakuva_suomenoja.pdf)>. Luettu 1.5.2012.
- [5] Siemens AG. 2008. Verkkoanalysointilaite SENTRON PAC3200 -laitekäsi- kirja.
- [6] Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Helsinki: WSOY.
- [7] Mäkinen, Markku JJ. & Kallio, Raimo. 2004. Teollisuuden sähköasennukset. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.
- [8] Tiainen, Esa & Vitikkala, Veli-Pekka. 2004. Sähkö asennustekniikka 3. Espoo: Sähköinfo Oy.
- [9] Lindeman, Keijo & Sahinoja, Tapio. 2000. Sähkölaitteiden asennuksen perusteet. Helsinki: WSOY.
- [10] Verkkopalveluhinnasto. 2011. Verkkodokumentti. Fortum Sähkösii- rto Oy. <[http://www.fortum.com/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Sahkon-siirto-ja-liittymat/FSS\\_Verkkopalveluhinnasto\\_Fin\\_2011.pdf](http://www.fortum.com/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Sahkon-siirto-ja-liittymat/FSS_Verkkopalveluhinnasto_Fin_2011.pdf)>. Luettu 12.4.2012.
- [11] Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy.
- [12] Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2010. SFS-EN 50160. Yleisestä jake- luverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet.
- [13] Sähkötieto ry. 2006. ST 52.51.04 Sähkön laatu. Vinokuormitus, nollajohdin ja transienttiylijännitteet.
- [14] Kauppi, Veijo; Mäkinen, Pertti A; Reinikainen, Ville; Tiainen, Esa & Ylinen, Timo. 2010. Sähköasennukset 4. Espoo: Sähköinfo Oy.

- [15] Tiainen, Esa. 2007. Sähköasennusopas. Espoo: Sähköinfo Oy.

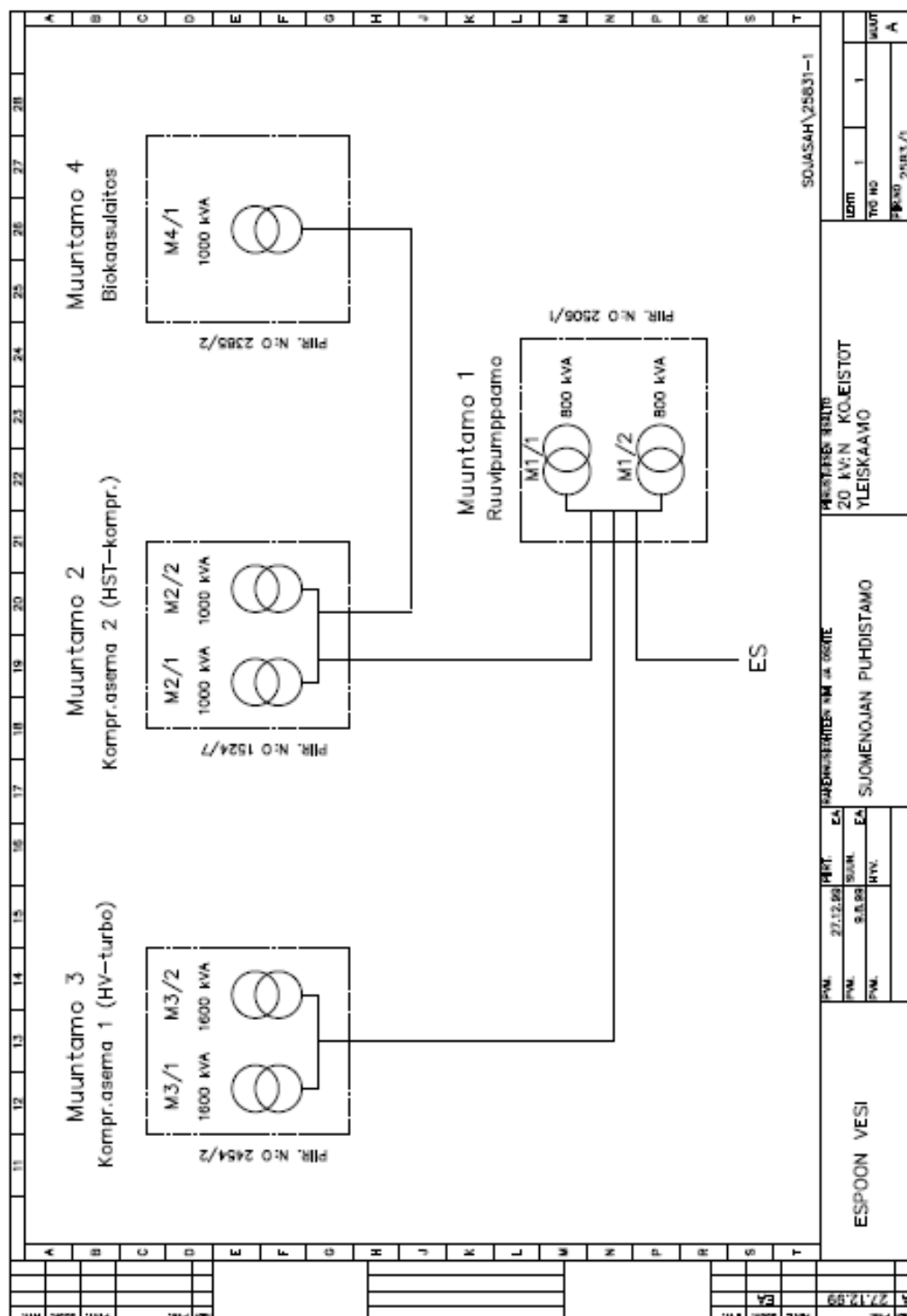
## Suomenojan jätevedenpuhdistamon prosessikaavio

Puhdistamon prosessikaavio [8, s. 19].



## Suomenojan jätevedenpuhdistamon 20 kV:n yleiskaavio

[HSY, Jan Strömdahl]



## Suomenojan jätevedenpuhdistamon ostosähkö 2010 - 2011

[HSY, Jan Strömdahl]

